



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

21 Aktenzeichen: 199 30 087.9  
22 Anmeldetag: 30. 6. 1999  
23 Offenlegungstag: 11. 1. 2001

71 Anmelder:  
Tassakos, Charalambos, Dr.-Ing., 52146 Würselen,  
DE  
74 Vertreter:  
Dreiss, Fuhlendorf, Steimle & Becker, 70188  
Stuttgart

72 Erfinder:  
gleich Anmelder

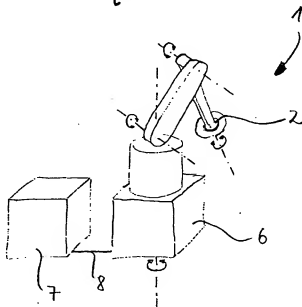
53 Entgegenhaltungen:  
DE 196 15 069 A1  
EP 03 77 755 A1  
EP 01 04 270 A1  
WO 89 01 850 A1

WEISS, L.E., SANDERSON, A.C., NEUMAN, Ch.P.:  
"Dynamic Sensor-Based Control of Robots with  
Visual Feedback" In: IEEE Journal of Robotics  
and Automation, Vol. RA-3, No. 5, October 1987,  
S. 404-417;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

- 54 Verfahren und Vorrichtung zur Regelung der Vorhalteposition eines Manipulators eines Handhabungsgeräts
- 57 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Regelung der Vorhalteposition eines in mehreren Freiheitsgraden bewegbaren Manipulators (2) eines Handhabungsgeräts (1) relativ zu einem Objekt (3) entlang einer Verfahrbahn. Um eine schnellere Regelung der Vorhalteposition zu ermöglichen, wird vorgeschlagen, dass mehrere Punkte zu mindestens eines Teils der Ist-Verfahrbahn gespeichert sind und für eine vorausschauende Regelung der Vorhalteposition des Manipulators (2) entlang dieses Teils der Verfahrbahn herangezogen werden.



Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Regelung der Vorhalteposition eines in mehreren Freiheitsgraden bewegbaren Manipulators eines Handhabungsgeräts relativ zu einem Objekt entlang einer Verfahrbahn. Die Erfindung betrifft außerdem ein Handhabungsgerät mit einem in mehreren Freiheitsgraden bewegbaren Manipulator, dessen Vorhalteposition relativ zu einem Objekt regelbar ist.

Das Handhabungsgerät ist bspw. als ein mehrgelenkiger Industrie-Roboter ausgebildet. Derartige Industrie-Roboter werden insbesondere in der Automobilindustrie in der Fertigung und der Qualitätssicherung eingesetzt. Für die unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten eines Industrie-Roboters kann der Manipulator beliebig ausgebildet sein.

Der Manipulator ist bspw. als ein Werkzeug, insbesondere als ein Schweißgerät, als ein Gerät zum Auftragen von Klebstoff, von Farbe oder von anderen Beschichtungen auf eine Oberfläche, als ein Bearbeitungsgerät o. ä. ausgebildet. Zum Ergreifen eines oder mehrerer Objekte kann der Manipulator als ein Greifer, ein Saugnapf o. ä. ausgebildet sein. Schließlich ist es denkbar, dass der Manipulator als ein Messkopf z. B. zum Messen des Oberflächenverlaufs eines Objekts, einer Spaltbreite, eines Spaltversatzes, einer Schichtdicke o. ä. ausgebildet ist.

Damit der Manipulator die ihm zugedachte Aufgabe erfüllen kann, muss er in eine definierte Vorhalteposition relativ zu einem Objekt gebracht werden. Unter dem Begriff Vorhalteposition wird gemäß dem vorliegenden Patent sowohl die Positionierung als auch die Ausrichtung des Manipulators relativ zu dem Objekt verstanden.

Aus dem Stand der Technik sind Handhabungsgeräte bekannt, die eine interne Steuerungseinrichtung aufweisen. Auf der Steuerungseinrichtung ist ein Steuerungsprogramm lauffähig, durch das der Manipulator entlang einer programmierten Verfahrbahn in die Vorhalteposition bewegt werden kann. Wenn das Objekt stets an derselben Position angeordnet ist, reicht eine solche Steuerung der Verfahrbahn bis zur Vorhalteposition vollkommen aus. Falls die Position des Objekts jedoch gewissen Schwankungen unterworfen ist, was der Regelfall ist, kann durch eine Steuerung alleine nicht mehr sichergestellt werden, dass eine bestimmte Vorhalteposition des Manipulators relativ zu dem Objekt stets mit der erforderlichen Genauigkeit eingenommen wird. Schwankungen der Position des Objekts können vielerlei Ursachen haben.

Um sicherzustellen, dass die Vorhalteposition des Manipulators relativ zu dem Objekt auch bei Schwankungen der Position des Objekts stets mit der geforderten Genauigkeit eingenommen wird, ist es aus dem Stand der Technik ebenfalls bekannt, die Vorhalteposition des Manipulators relativ zu dem Objekt zu regeln. Aus dem Stand der Technik sind unterschiedliche Verfahren zur Regelung der Vorhalteposition des Manipulators bekannt. Diese bekannten Verfahren zur Regelung der Vorhalteposition sind jedoch sehr kompliziert und langsam.

Im Rahmen der Regelung der Vorhalteposition des Manipulators relativ zu einem Objekt wird die Ist-Vorhalteposition des Manipulators zunächst mittels Sensoren erfasst und dann auf eine Soll-Vorhalteposition geregelt. Die Sensoren sind bspw. als optische oder als taktile Sensoren ausgebildet.

Insbesondere sind sie als Laser-Sensoren zum Messen von Abständen, als Kraft/Momenten-Sensoren zum Messen von Kräften bzw. Momenten oder als Berührungssensoren zur Detektion einer Berührung mit dem Objekt ausgebildet.

Die Sensoren sind in einem bestimmten Bezug (Position und Ausrichtung) zu dem Manipulator angeordnet. Vor der

Regelung der Vorhalteposition müssen die Sensoren in einen konkreten Bezug zu dem Manipulator und zu dem Objekt gebracht werden (Einrichten) und die Parameter der Regelung an den konkreten Bezug angepasst werden (Kalibrieren). Der Bezug der Sensoren zu dem Manipulator kann sich aufgrund von Temperaturschwankungen, mechanischen Einwirkungen auf die Sensoren oder den Manipulator, o. ä. verändern, wodurch ein erneutes Kalibrieren und u. U. sogar eine erneutes Einrichten der Vorrichtung zur Durchführung der Regelung notwendig wird. Während des Einrichtens und Kalibrierens steht die Vorrichtung nicht für eine Regelung zur Verfügung, die Regelung der Vorhalteposition muss unterbrochen werden.

Sämtliche bekannten Verfahren zur Regelung der Vorhalteposition des Manipulators haben außerdem den Nachteil, dass die Verfahrgeschwindigkeit des Manipulators relativ klein ist, da die Regelung in Unkenntnis der bevorstehenden, zu regelnden Verfahrbahn des Manipulators erfolgt. Deshalb muss die Verfahrgeschwindigkeit so klein gewählt werden, dass auch im Extremfall einer Verfahrschleifenumkehr eine rasche und genau Positionierung des Manipulators sichergestellt werden kann. Bei einer zu hohen Verfahrgeschwindigkeit würde der Manipulator bei stark gekrümmten Verfahrbahnen oder einer Verfahrschleifenumkehr aufgrund der Massenträgheit über die geregelte Verfahrbahn hinaus-schießen und somit die geregelte Verfahrbahn verlassen.

Es ist deshalb eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren der eingangs genannten Art dahingehend auszugestalten und weiterzubilden, dass eine möglichst schnelle Regelung der Vorhalteposition erreicht und dass insbesondere höhere Verfahrgeschwindigkeiten des Manipulators auf der Verfahrbahn realisiert werden können, ohne dass es zu einem Verlust an Regelungs-genauigkeit kommt.

Zur Lösung dieser Aufgabe schlägt die Erfindung aus-gehend von dem Verfahren der eingangs genannten Art vor, dass mehrere Punkte zumindest eines Teils der Ist-Verfahrbahn gespeichert sind und für eine vorausschauende Regelung der Vorhalteposition des Manipulators entlang dieses Teils der Verfahrbahn herangezogen werden.

Erfindungsgemäß ist erkannt worden, dass die Regelung der Vorhalteposition durch eine vorausschauende Regelung auf einfache Weise entscheidend beschleunigt werden kann. Während der vorausschauenden Regelung der Vorhalteposition wird der bevorstehende Verlauf der Verfahrbahn berücksichtigt. Wenn der bevorstehende Verlauf der Verfahrbahn es zulässt, bspw. bei einer geraden oder einer nur geringfügig gekrümmten Verfahrbahn, kann die Verfahrgeschwindigkeit des Manipulators hoch gewählt werden. Dadurch kann die Regelung der Vorhalteposition entlang einer Verfahrbahn entscheidend beschleunigt werden. Bei zunehmender Krümmung der bevorstehenden Verfahrbahn muss die Verfahrgeschwindigkeit zunehmend reduziert werden. Durch die Wahl einer geringen Verfahrgeschwindigkeit bei starken Krümmungen der bevorstehenden Verfahrbahn kann zudem die Genauigkeit der Regelung der Vorhalteposition des Manipulators entlang der Verfahrbahn entscheidend erhöht werden. Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren kann die Verfahrgeschwindigkeit somit dem Verlauf der bevorstehenden Verfahrbahn individuell angepasst werden.

Die Punkte der Ist-Verfahrbahn können auf unterschiedliche Weise, z. B. empirisch, simulativ oder durch Berechnung, bestimmt werden. Bei der empirischen Bestimmung der Punkte der Ist-Verfahrbahn können die einzelnen Punkte entweder mit dem Manipulator des Handhabungsgeräts manuell oder von einer ersten Steuereinrichtung gesteuert angefahren werden. Bei der simulativen Bestimmung der Punkte wird zunächst ein Modell des Handhabungsgeräts und des Objekts, vorzugsweise auf einem Computer, er-

stellt. Anhand dieses Modells wird dann durch Simulation der Verfahrbahn die Ist-Verfahrbahn bestimmt. Bei der mathematischen Berechnung der Punkte der Ist-Verfahrbahn wird zunächst ein mathematisches Modell des Handhabungsgeräts und des Objekts erstellt, und die Punkte werden dann durch Lösen mathematischer Gleichungen berechnet.

Gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung der vorliegenden Erfindung wird vorgeschlagen, dass die Ist-Verfahrbahn des Manipulators vor der Regelung der Vorhalteposition abgefahren wird und dabei die Punkte zumindest eines Teils der Ist-Verfahrbahn aufgenommen und abgespeichert werden. Die Ist-Verfahrbahn muss nicht mit besonders hohen Anforderungen an die Genauigkeit abgefahren werden, da die Verfahrbahn im Rahmen der nachfolgenden Regelung der Verfahrbahn des Manipulators korrigiert werden kann. Die abgefahrte Ist-Verfahrbahn stellt lediglich eine Abschätzung des Verlaufs der Ist-Verfahrbahn dar und muss so genau sein, dass sie für eine vorausschauende Regelung der Vorhalteposition des Manipulators entlang der Verfahrbahn herangezogen werden kann.

Die Ist-Verfahrbahn wird vorteilhafterweise von dem Manipulator vor der Regelung der Vorhalteposition von einer internen Steuerungseinrichtung des Handhabungsgeräts gesteuert abgefahren. Auf der internen Steuerungseinrichtung läuft ein Steuerungsprogramm ab, in dem die einzelnen Punkte der Ist-Verfahrbahn programmiert sind. Das Steuerungsprogramm steuert das Handhabungsgerät derart an, dass der Manipulator während des Ablaufs des Steuerungsprogramms die Ist-Verfahrbahn abfährt. Dabei werden die Punkte zumindest eines Teils der Ist-Verfahrbahn aufgenommen und abgespeichert. Außer den in dem Steuerungsprogramm programmierten Punkten der Ist-Verfahrbahn können noch zusätzliche Punkte der Ist-Verfahrbahn aufgenommen und gespeichert werden.

Die Punkte zumindest eines Teils der Ist-Verfahrbahn werden vorzugsweise von einer externen Regelungseinrichtung aufgenommen und abgespeichert. Auf der externen Regelungseinrichtung läuft ein Regelungsprogramm ab, das die Vorhalteposition des Manipulators auf der Verfahrbahn regelt. Die externe Regelungseinrichtung ist bspw. als ein Personal Computer (PC) oder als ein Industrie-PC ausgebildet. Das Regelungsprogramm kann in einer Standard-Programmiersprache programmiert und ohne großen Aufwand umprogrammiert werden. In einem bestimmten Modus (Record-Mode) vor der Regelung der Vorhalteposition kann das Regelungsprogramm auch die Punkte der von dem Manipulator abgefahrenen Ist-Verfahrbahn aufnehmen und abspeichern. Die gespeicherten Punkte werden dann in einem anderen Modus (Operation-Mode) für die vorausschauende Regelung der Vorhalteposition herangezogen.

Gemäß einer anderen vorteilhaften Weiterbildung der vorliegenden Erfindung wird vorgeschlagen, dass die externe Regelungseinrichtung von der internen Steuerungseinrichtung aufgerufen wird. Das Steuerungsprogramm der internen Steuerungseinrichtung ist üblicherweise in einer proprietären, nur auf der Steuerungseinrichtung eines bestimmten Handhabungsgeräts lauffähigen Programmierungssprache programmiert. Es wäre nur mit einem großen Aufwand möglich, das gesamte Regelungsprogramm in das Steuerungsprogramm zu integrieren. Deshalb sind in dem Steuerungsprogramm bestimmte Programmierbefehle (Aufrufbefehle, Rückholbefehle) vorgesehen, um das Regelungsprogramm der externen Regelungseinrichtung von dem Steuerungsprogramm aus aufzurufen. Das Einfügen dieser Programmierbefehle in das Steuerungsprogramm ist mit einem geringen Aufwand möglich. Je nach dem in welchem Modus die Regelung betrieben wird, werden durch einen Aufruf des Regelungsprogramms der Regelungseinrichtung die

Punkte der Ist-Verfahrbahn aufgenommen und gespeichert (Record-Mode) oder die Vorhalteposition vorausschauend geregelt (Operation-Mode).

In einer anderen vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung wird vorgeschlagen, dass vor der Regelung der Vorhalteposition die Soll-Vorhalteposition des Manipulators angefahren wird, während einer Veränderung der Soll-Vorhalteposition um jeweils einen Freiheitsgrad Messdaten, durch die die Vorhalteposition des Manipulators charakterisiert ist, aufgenommen und gespeichert werden und die Regelung der Vorhalteposition in Abhängigkeit von den Messdaten durchgeführt wird. Zwischen den aufgenommenen Messdaten und der Position des Manipulators besteht ein Zusammenhang. Somit sind in den aufgenommenen Messdaten Informationen über die Position des Manipulators enthalten.

Die Soll-Vorhalteposition wird in einem weiteren Modus (Parameter-Mode) vor der Regelung der Vorhalteposition angefahren. Zum Anfahren der Soll-Vorhalteposition im Parameter-Mode werden die im Record-Mode gespeicherten Punkte der Ist-Verfahrbahn herangezogen. Sobald die Soll-Vorhalteposition erreicht ist, beginnt eine Trainingsphase, in der für die spätere, im Rahmen des Operation-Mode durchgeführte Regelung der Vorhalteposition benötigte Informationen ermittelt werden.

Während der Trainingsphase wird der Manipulator um die Soll-Vorhalteposition um jeweils einen Freiheitsgrad in unterschiedliche Vorhaltepositionen relativ zu dem Objekt bewegt. Der Manipulator wird um jeden Freiheitsgrad in Vorhaltepositionen bewegt, die vorzugsweise zu beiden Seiten der Soll-Vorhalteposition liegen. Die Vorhaltepositionen des Manipulators werden durch Sensoren ermittelt, die vorzugsweise an dem Manipulator befestigt sind. Die Sensoren liefern Messdaten anhand derer eine Vorhalteposition des Manipulators charakterisiert ist. Die Messdaten sind bspw. die Abstände von den Sensoren zu dem Objekt, Kräfte oder Momente, die von dem Objekt auf die Sensoren einwirken. Die Messdaten können auch Bildmessdaten sein. Bildmessdaten werden durch Vermessen von Bildern gewonnen, die von einer CCD-Kamera o.ä. aufgenommen wurden. Im Rahmen der Trainingsphase werden die Messdaten für jeden der Freiheitsgrade für jede der Vorhaltepositionen aufgenommen. Es ist denkbar, dass die gespeicherten Messdaten für die Regelung der Vorhalteposition weiterverarbeitet werden. Dann ist die Trainingsphase für diese Soll-Vorhalteposition abgeschlossen. Der Manipulator kann eine weitere Soll-Vorhalteposition anfahren und für diese Soll-Vorhalteposition eine weitere Trainingsphase durchlaufen, bis alle Soll-Vorhaltepositionen angefahren worden sind. Dann ist der Parameter-Mode abgeschlossen. Die spätere, im Rahmen des Operation-Mode durchgeführte Regelung der Vorhalteposition wird in Abhängigkeit von den gespeicherten Messdaten durchgeführt.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren ersetzt die Trainingsphase das bei herkömmlichen, aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren zum Regeln der Vorhalteposition des Manipulators eines Handhabungsgeräts notwendige Einrichten (Positionierung der Sensoren relativ zu dem Objekt) und Kalibrieren (Einstellen der Parameter der Regelung).

Auch bei diesem Verfahren, bei dem vor der Regelung der Vorhalteposition eine Trainingsphase durchlaufen wird, werden mehrere Punkte zumindest eines Teils der Ist-Verfahrbahn gespeichert und für eine vorausschauende Regelung der Vorhalteposition des Manipulators entlang dieses Teils der Verfahrbahn herangezogen. Das Durchlaufen einer Trainingsphase vor der Regelung der Vorhalteposition hat die angegebenen Vorteile aber auch ohne diese Merkmale des Kennzeichens des Patentanspruchs 1. Der Schutz des

Patents soll sich deshalb auch auf ein Verfahren der zuletzt genannten Art beziehen, bei dem die im Kennzeichen des Patentspruchs 1 genannten Merkmale fehlen.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird vorgeschlagen, dass vor der Regelung der Vorhalteposition

- die Soll-Vorhalteposition angefahren wird,
- ein Soll-Messvektor mit den Messdaten aufgenommen wird,
- für jeden Freiheitsgrad der Manipulator des Handhabungsgeräts aus der Soll-Vorhalteposition heraus in mehrere Vorhaltepositionen bewegt und in jeder Vorhalteposition ein Messvektor aufgenommen wird,
- für jeden Freiheitsgrad für dieselben Messdaten der Messvektoren der Betrag des Gradienten ermittelt wird und in einer Gradientenmatrix gespeichert wird, und im Rahmen der Regelung der Vorhalteposition
- ein Korrekturvektor aus der Multiplikation des Kehrwerts der Gradientenmatrix mit der Differenz des Soll-Messvektors und eines Ist-Messvektors in der Soll-Vorhalteposition des Manipulators oder anhand eines anderen geeigneten Verfahrens ermittelt wird und
- die Vorhalteposition in Abhängigkeit vom Korrekturvektor geregelt wird.

Gemäß dieser bevorzugten Ausführungsform werden in der Trainingsphase im Parameter-Mode die für die Soll-Vorhalteposition aufgenommenen Messdaten in einem Soll-Messvektor und die Messdaten, die für im Rahmen der Trainingsphase angefahrne Vorhaltepositionen aufgenommen wurden, in Messvektoren gespeichert. Für jeden Freiheitsgrad, um den der Manipulator bewegbar ist, werden also von der Soll-Vorhalteposition aus mehrere Vorhaltepositionen in jede Richtung angefahren und in jeder Vorhalteposition ein Messvektor aufgenommen. Die Dimension der Messvektoren entspricht der Anzahl der für jede Vorhalteposition aufgenommenen Messdaten. Die Dimension aller Messvektoren ist gleich groß.

Für jeden Freiheitsgrad werden die Messvektoren und der Soll-Messvektor dann weiterverarbeitet. Aus denselben Messdaten der Messvektoren eines Freiheitsgrades wird der Betrag des Gradienten ermittelt und in einer Gradientenmatrix gespeichert. Die Gradientenmatrix hat somit die Dimensionen (Anzahl der für jede Vorhalteposition aufgenommenen Messdaten)  $\times$  (Anzahl der Freiheitsgrade). Es ist denkbar, den Kehrwert der Gradientenmatrix bereits in dem Parameter-Mode zu berechnen und abzuspeichern. Vorzugsweise wird er aber erst in dem nachfolgenden Operation-Mode berechnet. Damit ist die Trainingsphase für diese Soll-Vorhalteposition abgeschlossen. Die Gradientenmatrix kann auch als Jakobimatrix oder als Sensibilitätsmatrix bezeichnet werden.

Im Rahmen des Operation-Mode wird dann für die Regelung der Vorhalteposition des Manipulators ein Ist-Messvektor ermittelt, d. h. es werden die Messdaten in der momentanen Vorhalteposition des Manipulators des Handhabungsgeräts ermittelt und in dem Ist-Messvektor gespeichert. Dann wird ein Differenzvektor aus der Differenz des Soll-Messvektors und des Ist-Messvektors gebildet. Des Weiteren wird der Kehrwert der Gradientenmatrix berechnet und wahlweise abgespeichert.

Schließlich wird ein Korrekturvektor aus der Multiplikation des Kehrwerts der Gradientenmatrix mit dem Differenzvektor berechnet und die Vorhalteposition in Abhängigkeit von dem Korrekturvektor geregelt.

Der Korrekturvektor kann auch mittels eines anderen geeigneten Verfahrens bestimmt werden, bspw. durch den Ein-

satz eines sequentiellen Kalmanfilters. Derartige geeignete Verfahren zum Berechnen des Korrekturvektors sind aus dem Stand der Technik bekannt und können von einem Fachmann nach Belieben eingesetzt werden. Diese anderen geeigneten Verfahren haben den Vorteil, dass auf eine relativ aufwendige Bildung des Kehrwerts der Gradientenmatrix verzichtet werden kann.

Während des Operation-Mode fährt der Manipulator zunächst die Verfahrbahn gemäß den während des Record-Mode gespeicherten Punkten ab. Diese Verfahrbahn wird dann im Rahmen der Regelung der Vorhalteposition des Manipulators mit Hilfe des Korrekturvektors korrigiert. Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird die Vorhalteposition also nicht absolut, sondern lediglich relativ zu einer Vorhalteposition auf der gespeicherten Verfahrbahn geregelt.

Vorteilhafterweise wird die Ist-Vorhalteposition im Rahmen der Regelung der Vorhalteposition um einen Bruchteil des Korrekturvektors korrigiert und anschließend der Ist-Messvektor in der korrigierten Ist-Vorhalteposition und daraus der Korrekturvektor erneut ermittelt. Die Ist-Vorhalteposition wird also nicht um den gesamten Korrekturvektor korrigiert. Um ein Überspringen der Regelung zu verhindern, wird vielmehr versucht, sich der Soll-Vorhalteposition langsam von einer Richtung her anzunähern. Dadurch wird eine Regelung mit einem gedämpften Einschwingverhalten realisiert. Durch eine geeignete Wahl des Bruchteils des Korrekturvektors kann die Dämpfungskonstante der Regelung bestimmt werden.

Die Regelung der Vorhalteposition wird vorzugsweise abgebrochen, wenn jedes der Elemente des Korrekturvektors kleiner als ein Abbruchkriterium ist. Durch eine geeignete Wahl des Abbruchkriteriums kann einerseits die Genauigkeit der Regelung und andererseits die Regelungsgeschwindigkeit bestimmt werden. Je kleiner der Wert des Abbruchkriteriums gewählt wird, desto genauer kann die Regelung der Vorhalteposition durchgeführt werden. Ein kleiner Wert des Abbruchkriteriums bedeutet jedoch auch, dass die Regelung mehr Zeit benötigt, bis das Abbruchkriterium erfüllt ist.

Um eine Regelbarkeit der Vorhalteposition des Manipulators innerhalb eines bestimmten Arbeitsvolumens der Regelung sicherzustellen, sollten die aufgenommenen Messvektoren nach Möglichkeit das gesamte Arbeitsvolumen abdecken. Des Weiteren sollten für jeden Freiheitsgrad so viele Messvektoren aufgenommen werden, dass eine zuverlässige Berechnung des Betrags des Gradienten der Messdaten möglich ist. Deshalb wird gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung vorgeschlagen, dass für jeden Freiheitsgrad von der Soll-Vorhalteposition aus mindestens zwei Messvektoren in jede Richtung aufgenommen werden. Vorteilhafterweise werden jedoch für jeden Freiheitsgrad von der Soll-Vorhalteposition aus fünf Messvektoren in jede Richtung aufgenommen. Somit ergeben sich für jeden Freiheitsgrad zehn Messvektoren und der Soll-Messvektor, also elf Messvektoren. Für jedes der aufgenommenen und in den Messvektoren gespeicherte Messdatum wird dann der Betrag des Gradienten berechnet und in der Gradientenmatrix abgespeichert.

Die Messvektoren müssen zusammen für jeden Freiheitsgrad, in dem die Vorhalteposition des Manipulators des Handhabungsgeräts geregelt wird, mindestens ein unabhängiges Messdatum enthalten. Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird vorgeschlagen, dass die Messvektoren zusammen mindestens sechs Messdaten enthalten. Dadurch kann die Position und Ausrichtung des Manipulators relativ zu dem Objekt in sechs Freiheitsgraden eindeutig charakterisiert werden. Damit kann die

Vorhalteposition des Manipulators um sechs Freiheitsgrade im dreidimensionalen Raum geregelt werden. Vorzugsweise enthalten die Messvektoren jeweils 32 Messdaten.

Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, eine Vorrichtung der eingangs genannten Art dahingehend auszugestalten und weiterzubilden, dass eine möglichst schnelle Regelung der Vorhalteposition erreicht und dass insbesondere höhere Verfahrgeschwindigkeiten des Manipulators auf der Verfahrbahn realisiert werden können, ohne dass es zu einem Verlust an Regelungsgenauigkeit kommt.

Zur Lösung dieser Aufgabe schlägt die Erfindung ausgehend von der Vorrichtung der eingangs genannten Art vor, dass die Vorrichtung Mittel zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 13 aufweist.

Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht schließlich darin, ein Handhabungsgerät der eingangs genannten Art dahingehend auszugestalten und weiterzubilden, dass eine möglichst schnelle Regelung der Vorhalteposition erreicht und dass insbesondere höhere Verfahrgeschwindigkeiten des Manipulators auf der Verfahrbahn realisiert werden können, ohne dass es zu einem Verlust an Regelungsgenauigkeit kommt.

Zur Lösung dieser Aufgabe schlägt die Erfindung ausgehend von dem Handhabungsgerät der eingangs genannten Art vor, dass das Handhabungsgerät Mittel zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 13 aufweist.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung und das erfindungsgemäße Handhabungsgerät weisen insbesondere Mittel auf, um in einem Record-Mode mehrere Punkte zumindest eines Teils der Ist-Verfahrbahn zu speichern und die gespeicherten Punkte dann in einem Operation-Mode für eine vorausschauende Regelung der Vorhalteposition des Manipulators entlang dieses Teils der Verfahrbahn heranzuziehen. Des Weiteren weisen die erfindungsgemäße Vorrichtung und das erfindungsgemäße Handhabungsgerät Mittel auf, um in einem Parameter-Mode im Rahmen einer Trainingsphase den Manipulator in eine Soll-Vorhalteposition zu fahren, um den Manipulator um die einzelnen Freiheitsgrade des Handhabungsgeräts in andere Vorhaltepositionen zu verfahren und für jeden Freiheitsgrad in jeder Vorhalteposition die Messdaten aufzunehmen und zu speichern, durch die die entsprechende Vorhalteposition charakterisiert ist.

Bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung und dem erfindungsgemäßen Handhabungsgerät kann die Verfahrgeschwindigkeit des Manipulators aufgrund der vorausschauenden Regelung besonders groß gewählt werden. Außerdem ersetzt die Trainingsphase das Einrichten und Kalibrieren der Sensoren. Mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung und dem erfindungsgemäßen Handhabungsgerät ist somit eine schnellere Regelung der Vorhalteposition möglich, ohne dass es zu einem Verlust an Regelungsgenauigkeit kommt.

Gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung der vorliegenden Erfindung wird vorgeschlagen, dass an dem Manipulator des Handhabungsgeräts zur Ermittlung der Ist-Vorhalteposition des Manipulators relativ zu dem Objekt mindestens ein Sensor befestigt ist.

Der oder jeder Sensor ist vorteilhafterweise derart relativ zu dem Objekt angeordnet, dass die Folge der Messdaten für einen Freiheitsgrad aufgenommenen Messvektoren streng monoton ist. Dies ist eine wichtige Voraussetzung, um den Manipulator aus allen Positionen und Ausrichtungen relativ zu dem Objekt stets in die gewünschte Soll-Vorhalteposition regeln zu können.

Des Weiteren muss die Beobachtbarkeit der Regelung sichergestellt sein. Deshalb wird gemäß einer anderen vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung vorgeschlagen, dass

der oder jeder Sensor derart relativ zu dem Objekt angeordnet ist, dass in der Gradientenmatrix für jeden Freiheitsgrad jeweils für mindestens einen aufgenommenen Messdaten ein Gradienten-Betragswert enthalten ist.

5 Damit die in der Gradientenmatrix im Rahmen der Regelung der Vorhalteposition auch verarbeitet werden können, und zu einem zuverlässigen Ergebnis führen, wird vorgeschlagen, dass der oder jeder Sensor derart relativ zu dem Objekt angeordnet ist, dass die Gradienten-Betragswerte in der Gradientenmatrix signifikant sind. Man spricht von signifikanten Gradienten-Betragswerten, wenn diese von dem Messrauschen der aufgenommenen Messdaten unterscheidbar sind. Die Gradienten-Betragswerte sind bspw. unterscheidbar, wenn sie etwa doppelt so groß sind wie das Messrauschen der aufgenommenen Messdaten. Falls die Gradientenstärke nicht ausreichend groß ist, wird der entsprechende Gradienten-Betragswert als nicht vorhanden gewertet. Die Gradienten-Betragswerte in der Gradientenmatrix sind vorzugsweise in etwa mindestens dreimal so groß wie das Messrauschen.

Die Kriterien der Monotonie der Folge der Messdaten, der Beobachtbarkeit der Regelung und der Gradientenstärke können durch die Position der Sensoren relativ zu dem Manipulator beeinflusst werden. Der genaue Bezug der Sensoren zu dem Manipulator ist allerdings von untergeordneter Bedeutung, solange die o. g. Kriterien erfüllt sind. Der Bezug der Sensoren zu dem Manipulator wird während der Trainingsphase erfasst und über die aufgenommenen und abgespeicherten Messdaten in der Regelung berücksichtigt.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird vorgeschlagen, dass der oder jeder Sensor als ein optischer Sensor, insbesondere als eine CCD-Kamera, ausgebildet ist. Mittels CCD-Kameras kann ein Objekt auf vielfältige Weise charakterisiert werden. Es ist denkbar, dass die Messdaten bei als CCD-Kameras ausgebildeten Sensoren als Abstände zwischen den Sensoren und dem Objekt, als Pixel auf dem CCD-Chip o. ä. ausgebildet sind. CCD-Kameras haben zudem den Vorteil, dass ihr Blickfeld zum Ausrichten der Sensoren relativ zu dem Objekt auf einem Bildschirm dargestellt werden kann. Das erleichtert die Ausrichtung der Sensoren erheblich.

Ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung wird im Folgenden anhand der Zeichnung näher erläutert. Es zeigt:

Fig. 1 ein erfindungsgemäßes Handhabungsgerät gemäß einer bevorzugten Ausführungsform;

Fig. 2 den Manipulator des Handhabungsgeräts aus Fig. 1 im Ausschnitt; und

Fig. 3 eine Verfahrbahn eines erfindungsgemäßen Handhabungsgeräts.

In Fig. 1 ist ein erfindungsgemäßes Handhabungsgerät in seiner Gesamtheit mit dem Bezugszeichen 1 gekennzeichnet. Das Handhabungsgerät 1 weist einen Manipulator 2 auf, der in sechs Freiheitsgraden (x, y, z, a, b, c) bewegbar ist. Das Handhabungsgerät 1 ist bspw. als ein Industrie-Roboter ausgebildet, dessen Manipulator 2 bspw. als ein beliebiges Werkzeug oder als ein Messkopf zur Aufnahme beliebiger Messgrößen (Temperatur, Abstand, etc.) ausgebildet ist.

5 Damit der Manipulator 2 die ihm zugeordnete Aufgabe erfüllen kann, muss er in eine definierte Vorhalteposition (vgl. Fig. 2) relativ zu einem Objekt 3 gebracht werden. Unter dem Begriff Vorhalteposition wird gemäß dem vorliegenden Patent auch die Ausrichtung des Manipulators 2 relativ zu dem Objekt 3 verstanden. Die Erfindung schlägt ein Verfahren zur Regelung der Vorhalteposition vor. Das erfindungsgemäße Verfahren kann nicht nur für jede Art von Pick-and-place-Anwendungen, sondern auch für Anwendungen, bei denen einem bestimmten Linienverlauf gefolgt werden

muss, bspw. zum Schweißen, Kleben oder Abdichten von Kanten, eingesetzt werden.

Gemäß dem vorliegenden Ausführungsbeispiel soll ein Schiebedach 4 eines Kraftfahrzeugs von dem Manipulator 2 ergriffen und in eine entsprechende Öffnung (Objekt 3) im Dach 5 der Karosserie des Kraftfahrzeugs eingesetzt werden. Der Manipulator 2 ist als ein Saugnapf zum Greifen des Schiebedachs 4 ausgebildet. Die Vorhalteposition ist eine Position oberhalb der Öffnung, von der aus das Schiebedach 4 in einer geradlinigen, senkrechten Bewegung nach unten in die Öffnung bewegt werden kann.

Das Handhabungsgerät 1 weist eine interne Steuerungseinrichtung 6 auf. Auf der Steuerungseinrichtung 6 ist ein Steuerungsprogramm lauffähig, durch das der Manipulator 2 entlang einer programmierten Verfahrbahn (vgl. Fig. 3) in die Vorhalteposition bewegt werden kann. Wenn das Objekt 3, im vorliegenden Ausführungsbeispiel die Öffnung im Dach 5 der Karosserie des Kraftfahrzeugs, stets an derselben Position angeordnet ist, reicht eine solche Steuerung der Verfahrbahn bis zur Vorhalteposition vollkommen aus. Falls die Position des Objekts 3 jedoch gewissen Schwankungen unterworfen ist, kann durch eine Steuerung alleine nicht mehr sichergestellt werden, dass eine bestimmte Vorhalteposition des Manipulators 2 relativ zu dem Objekt 3 stets mit der erforderlichen Genauigkeit eingenommen wird. Schwankungen des Objekts 3 können sich bspw. aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Positionierung der Karosserie relativ zu dem Handhabungsgerät 1 oder aufgrund der Bewegung der Karosserie des Kraftfahrzeugs auf einer Fertigungsstraße ergeben.

Um sicherzustellen, dass die Vorhalteposition des Manipulators 2 relativ zu dem Objekt 3 auch bei Schwankungen der Position des Objekts 3 stets mit der geforderten Genauigkeit eingenommen wird, wird in solchen Fällen die Vorhalteposition des Manipulators 2 relativ zu dem Objekt 3 geregelt. Aus dem Stand der Technik sind mehrere Verfahren zur Regelung der Vorhalteposition des Manipulators 2 bekannt. Diese Verfahren sind jedoch sehr arbeits- und zeitaufwendig.

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Regelung der Vorhalteposition des Manipulators 2 weist verschiedene Merkmale zur Beschleunigung und Vereinfachung der Regelung auf. Das Verfahren ist auf einer externen Regelungseinrichtung 7 implementiert (vgl. Fig. 1). Die Regelungseinrichtung 7 ist als ein herkömmlicher Personal-Computer (PC) oder Industrie-PC ausgebildet. Auf der Regelungseinrichtung 7 ist ein Regelungsprogramm, das in einer herkömmlichen Programmiersprache programmiert ist, lauffähig. In Fig. 1 ist die Regelungseinrichtung 7 als von dem Handhabungsgerät 1 getrennt ausgebildet. Es ist jedoch auch denkbar, dass die Regelungseinrichtung 7 in das Handhabungsgerät 1 integriert ist. Das Steuerungsprogramm der Steuerungseinrichtung 6 ist in einer proprietären, nur auf der Steuerungseinrichtung 6 dieses Handhabungsgeräts 1 lauffähigen Programmiersprache programmiert. Das Steuerungsprogramm weist an bestimmten Stellen Programmierbefehle (Aufrufbefehle, Rückholbefehle) auf, um das Regelungsprogramm der externen Regelungsvorrichtung 7 von dem Steuerungsprogramm aus aufrufen bzw. um von dem Regelungsprogramm wieder zu dem Steuerungsprogramm zurückzukehren. Zwischen der Steuerungseinrichtung 6 und der Regelungseinrichtung 7 ist eine Datenleitung 8 zum Austausch von Daten vorgesehen.

In Fig. 2 ist zu erkennen, dass an dem Manipulator 2 vier als CCD-Kameras ausgebildete Sensoren 9 angeordnet sind. Durch die Sensoren 9 werden die Verläufe der Kanten 10 in Relation zu dem Manipulator 2 gesetzt. Dazu werden Messdaten, die im vorliegenden Ausführungsbeispiel als Pixel-

werte der CCD-Chips der Sensoren 9 ausgebildet sind, aufgenommen und in Messvektoren gespeichert.

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Regelung der Vorhalteposition des Manipulators 2 relativ zu dem Objekt 3 weist drei unterschiedliche Betriebszustände auf. In einem ersten Betriebszustand, dem sog. Record-Mode, wird die Verfahrbahn A bis B (vgl. Fig. 3) zu einer Vorhalteposition hin und von der Vorhalteposition weg von dem Steuerungsprogramm der Steuerungseinrichtung 6 gesteuert abgefahren. In dem Bereich der Verfahrbahn zwischen den Punkten C und D liegt ein für die Regelung interessanter Bereich mit einem oder mehreren Vorhaltepositionen des Manipulators 2, die relativ zu dem Objekt 3 geregelt werden sollen. Wenn der Manipulator 2 beim Abfahren der Verfahrbahn den Punkt C erreicht hat, wird das Regelungsprogramm der Regelungseinrichtung 7 aufgerufen. Während des gesteuerten Abfahrens der Verfahrbahn von dem Punkt C bis D werden dann einer oder mehrere Punkte von dem Regelungsprogramm aufgenommen und gespeichert. Wenn die Verfahrbahn den Punkt D erreicht hat, wird das Regelungsprogramm beendet. Damit ist der Record-Mode beendet. Auf die gespeicherten Punkte der Verfahrbahn wird dann in einem dritten Betriebszustand der Regelung zugegriffen.

In einem zweiten Betriebszustand, dem sog. Parameter-Mode, fährt der Manipulator 2 von dem Steuerungsprogramm gesteuert die Verfahrbahn von dem Punkt A zu dem Punkt C ab. Wenn die Verfahrbahn den Punkt C erreicht hat, wird das Regelungsprogramm aufgerufen, und die Steuerung des Manipulators 2 wird von dem Steuerungsprogramm an das Regelungsprogramm abgegeben. Das Regelungsprogramm fährt die gespeicherte Verfahrbahn zwischen den Punkten C und D ab. Auf der Verfahrbahn werden diejenigen Vorhaltepositionen angefahren, die relativ zu dem Objekt geregelt werden sollen, und für jede Vorhalteposition wird eine Trainingsphase durchlaufen. Wenn die von dem Regelungsprogramm gesteuerte Verfahrbahn den Punkt D erreicht hat, wird das Regelungsprogramm beendet und die Steuerung des Manipulators 2 entlang der Verfahrbahn wieder an das Steuerungsprogramm zurückgegeben. Der Manipulator 2 fährt dann von dem Steuerungsprogramm gesteuert die restliche Verfahrbahn von dem Punkt D bis B ab. Damit ist der Parameter-Mode beendet.

Für jede Vorhalteposition, die relativ zu dem Objekt 3 geregelt werden soll, wird eine Trainingsphase durchgeführt. Dazu wird zunächst die Soll-Vorhalteposition mit dem Manipulator 2 angefahren, und von den Sensoren 9 werden die Werte von 32 Messdaten, durch die die Soll-Vorhalteposition charakterisiert ist, aufgenommen und in einem Soll-Messvektor  $y_{\text{soll}}$  gespeichert. Der Soll-Messvektor  $y_{\text{soll}}$  hat somit die Dimension  $32 \times 1$  (32 Messdaten  $\times 1$  Wert). Anschließend wird der Manipulator 2 nacheinander um jeden der sechs Freiheitsgrade in fünf Vorhaltepositionen in der einen Richtung der Soll-Vorhalteposition und in fünf Vorhaltepositionen in der anderen Richtung der Soll-Vorhalteposition bewegt. In jeder Vorhalteposition werden die entsprechenden Werte der 32 Messdaten aufgenommen und in Messvektoren gespeichert. Aus den zehn Messvektoren und dem Soll-Messvektor  $y_{\text{soll}}$  wird dann für jeden der sechs Freiheitsgrade der Betrag des Gradienten eines bestimmten Messdatums berechnet und in einer Gradientenmatrix C abgespeichert. Die Gradientenmatrix C hat somit die Dimension  $32 \times 6$  (32 Messdaten  $\times 6$  Freiheitsgrade). Für jeden der zu regelnden Vorhaltepositionen erhält man somit einen Soll-Messvektor  $y_{\text{soll}}$  und die Gradientenmatrix C.

In einem dritten Betriebszustand, dem sog. Operation-Mode, fährt der Manipulator 2 von dem Steuerungsprogramm gesteuert die Verfahrbahn von dem Punkt A zu dem

Punkt C ab. Wenn die Verfahrbahn den Punkt C erreicht hat, wird das Regelungsprogramm aufgerufen, und die Steuerung des Manipulators 2 wird von dem Steuerungsprogramm an das Regelungsprogramm abgegeben. Das Regelungsprogramm fährt die gesicherte Verfahrbahn zwischen den Punkten C und D ab. Die gesicherten Punkte der Verfahrbahn erlauben eine vorausschauende Regelung der Vorhaltepunkte auf der Verfahrbahn, was bei gleicher oder sogar höherer Genauigkeit eine wesentlich höhere Verfahrbahngeschwindigkeit als bei den aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren zum Regeln der Vorhalteposition eines Manipulators ermöglicht.

In dem Bereich der Verfahrbahn zwischen den Punkten E und F liegt ein für die Regelung interessanter Bereich mit einem oder mehreren Vorhaltepositionen des Manipulators 2, die relativ zu dem Objekt 3 geregelt werden sollen. Sobald die Verfahrbahn den Punkt E erreicht hat, erfolgt eine Regelung der Vorhalteposition auf der Verfahrbahn. Im Rahmen der Regelung der Vorhalteposition werden von den Sensoren 9 zunächst in der momentanen Ist-Vorhalteposition die entsprechenden Werte der Messdaten aufgenommen und in einem Ist-Messvektor  $y_{ist}$  gespeichert. Der Ist-Messvektor  $y_{ist}$  hat ebenfalls die Dimension  $32 \times 1$  (32 Messdaten  $\times 1$  Wert). Aus der Differenz des Soll-Messvektors und des Ist-Messvektors wird ein Differenz-Messvektor  $D_y$  gebildet ( $D_y = y_{soll} - y_{ist}$ ). Der Differenz-Messvektor  $D_y$  hat ebenfalls die Dimension  $32 \times 1$ . Dann wird der Kehrwert der Gradientenmatrix C berechnet und wahlweise abgespeichert. Aus dem Produkt des Kehrwerts des Gradientenvektors C und des Differenz-Messvektors  $D_y$  wird ein Korrekturvektor  $D_x$  ermittelt, der ebenfalls die Dimension  $32 \times 1$  hat. Es ist jedoch auch denkbar, dass der Korrekturvektor  $D_x$  mittels eines anderen geeigneten Verfahrens, bspw. durch den Einsatz eines sequentiellen Kalmanfilters, ermittelt wird.

Ein Teil des Korrekturvektors  $D_x$ , vorzugsweise etwa 10% des Korrekturvektors  $D_x$ , wird zur Korrektur der Ist-Vorhalteposition des Manipulators 2 herangezogen. In der neuen Ist-Vorhalteposition werden erneut die entsprechenden Werte der Messdaten aufgenommen und in einem Ist-Messvektor  $y_{ist}$  gespeichert. Wie oben bereits beschrieben wird erneut ein Korrekturvektor  $D_x$  berechnet und die Ist-Vorhalteposition in Abhängigkeit von dem Korrekturvektor  $D_x$  korrigiert. Die Korrektur der Ist-Vorhalteposition wird so lange wiederholt, bis die einzelnen Werte des Korrekturvektors  $D_x$  ein bestimmtes Abbruchkriterium erfüllt haben, d.h. bis der Manipulator 2 auf die Soll-Vorhalteposition geregelt ist.

#### Patentsprüche

1. Verfahren zur Regelung der Vorhalteposition eines in mehreren Freiheitsgraden bewegbaren Manipulators (2) eines Handhabungsgeräts (1) relativ zu einem Objekt (3) entlang einer Verfahrbahn, **dadurch gekennzeichnet**, dass mehrere Punkte zumindest eines Teils der Ist-Verfahrbahn gespeichert sind und für eine vorausschauende Regelung der Vorhalteposition des Manipulators (2) entlang dieses Teils der Verfahrbahn herangezogen werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Ist-Verfahrbahn des Manipulators (2) vor der Regelung der Vorhalteposition abgefahren wird und dabei die Punkte zumindest eines Teils der Ist-Verfahrbahn aufgenommen und abgespeichert werden.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Ist-Verfahrbahn von dem Manipulator (2) vor der Regelung der Vorhalteposition von einer inter-

nen Steuerungseinrichtung (6) des Handhabungsgeräts (1) gesteuert abgefahren wird.

4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Punkte zumindest eines Teils der Ist-Verfahrbahn von einer externen Regelungseinrichtung (7) aufgenommen und abgespeichert werden.

5. Verfahren nach Anspruch 3 und 4, dadurch gekennzeichnet, dass die externe Regelungseinrichtung (7) von der internen Steuerungseinrichtung (6) aufgerufen wird.

6. Verfahren zur Regelung der Vorhalteposition eines in mehreren Freiheitsgraden bewegbaren Manipulators (2) eines Handhabungsgeräts (1) relativ zu einem Objekt (3) entlang einer Verfahrbahn, insbesondere nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Soll-Vorhalteposition des Manipulators (2) vor der Regelung der Vorhalteposition angefahren wird, während einer Veränderung der Soll-Vorhalteposition um jeweils einen Freiheitsgrad Messdaten, durch die die Vorhalteposition des Manipulators (2) charakterisiert ist, aufgenommen und gespeichert werden und die Regelung der Vorhalteposition in Abhängigkeit von den Messdaten durchgeführt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass vor der Regelung der Vorhalteposition

- die Soll-Vorhalteposition angefahren wird,
- ein Soll-Messvektor ( $y_{soll}$ ) mit den Messdaten aufgenommen wird,
- für jeden Freiheitsgrad der Manipulator (2) des Handhabungsgeräts (1) aus der Soll-Vorhalteposition heraus in mehrere Vorhaltepositionen bewegt und in jeder Vorhalteposition ein Messvektor aufgenommen wird,
- für jeden Freiheitsgrad für dieselben Messdaten der Messvektoren der Betrag des Gradienten ermittelt und in einer Gradientenmatrix (C) gespeichert wird, und im Rahmen der Regelung der Vorhalteposition
- ein Korrekturvektor ( $D_x$ ) aus der Multiplikation des Kehrwerts der Gradientenmatrix (C) mit der Differenz des Soll-Messvektors ( $y_{soll}$ ) und eines Ist-Messvektors ( $y_{ist}$ ) in der Ist-Vorhalteposition des Manipulators (2) oder anhand eines anderen geeigneten Verfahrens ermittelt wird und
- die Vorhalteposition in Abhängigkeit von dem Korrekturvektor ( $D_x$ ) geregelt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Ist-Vorhalteposition des Manipulators (2) im Rahmen der Regelung der Vorhalteposition um einen Bruchteil des Korrekturvektors ( $D_x$ ) korrigiert wird und anschließend der Ist-Messvektor ( $y_{ist}$ ) in der korrigierten Ist-Vorhalteposition und daraus der Korrekturvektor ( $D_x$ ) erneut ermittelt wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Regelung der Vorhalteposition abgebrochen wird, wenn jedes der Elemente des Korrekturvektors ( $D_x$ ) kleiner als ein Abbruchkriterium ist.

10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass für jeden Freiheitsgrad von der Soll-Vorhalteposition aus mindestens zwei Messvektoren in jede Richtung aufgenommen werden.

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass für jeden Freiheitsgrad von der Soll-Vorhalteposition aus fünf Messvektoren in jede Richtung aufgenommen werden.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Messvektoren zusammen mindestens sechs Messdaten enthalten, damit die

Position und Ausrichtung des Manipulators (2) relativ zu dem Objekt (3) im dreidimensionalen Raum charakterisiert ist.

13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Messvektoren jeweils 32 Messdaten 5  
enthalten.

14. Vorrichtung zur Regelung der Vorhalteposition eines in mehreren Freiheitsgraden bewegbaren Manipulators (2) eines Handhabungsgeräts (1) relativ zu einem Objekt (3) entlang einer Verfahrbahn, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung Mittel zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 13 aufweist. 10

15. Handhabungsgerät (1) mit einem in mehreren Freiheitsgraden bewegbaren Manipulator (2), dessen Vorhalteposition relativ zu einem Objekt (3) regelbar ist, dadurch gekennzeichnet, dass das Handhabungsgerät (9) Mittel zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 13 aufweist. 15

16. Handhabungsgerät (1) nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass an dem Manipulator (2) des Handhabungsgeräts (1) zur Ermittlung der Ist-Vorhalteposition des Manipulators (2) relativ zu dem Objekt (3) mindestens ein Sensor (9) befestigt ist. 20

17. Handhabungsgerät (1) nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass der oder jeder Sensor (9) derart relativ zu dem Objekt (3) angeordnet ist, dass die Folge der Messdaten der für einen Freiheitsgrad aufgenommenen Messvektoren streng monoton ist. 25

18. Handhabungsgerät (1) nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass in der Gradientenmatrix (C) für jeden Freiheitsgrad jeweils für mindestens ein aufgenommenes Messdatum ein Gradienten-Betragswert enthalten ist. 30

19. Handhabungsgerät (1) nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass die Gradienten-Betragswerte in der Gradientenmatrix (C) signifikant sind. 35

20. Handhabungsgerät (1) nach einem der Ansprüche 15 bis 19, dadurch gekennzeichnet, dass der oder jeder Sensor (9) als ein optischer Sensor ausgebildet ist. 40

21. Handhabungsgerät (1) nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass der oder jeder Sensor (9) als eine CCD-Kamera ausgebildet ist. 45

---

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

---

45

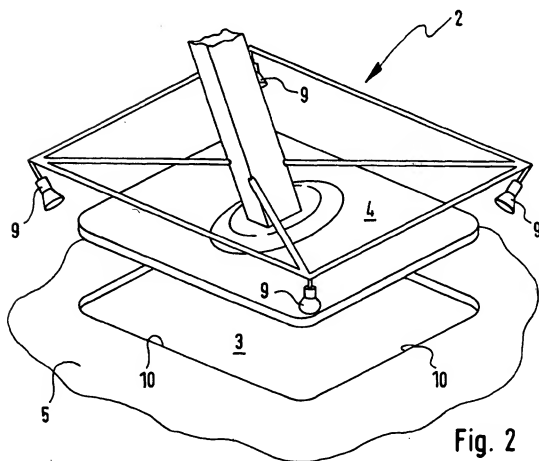
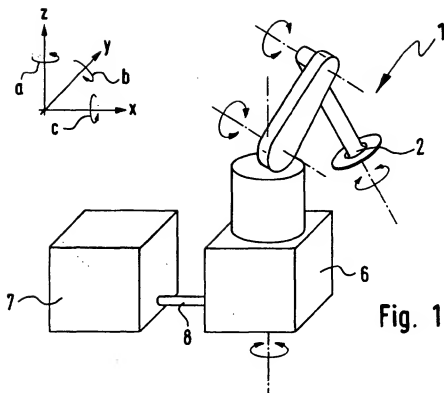
50

55

60

65





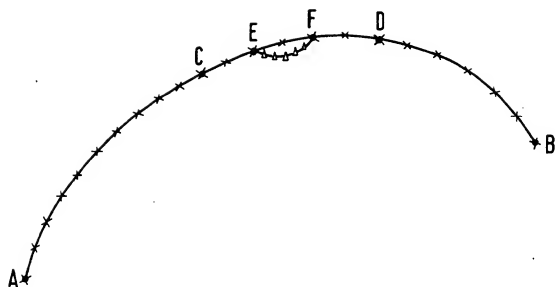


Fig. 3

**Translation of DE 199 30 087 A1**

Ref. 199 30 087.9

Filing Date: Jun. 30, 1999

Publication Date: Jan. 1, 2001

**METHOD AND DEVICE FOR CONTROLLING THE INTERMEDIATE POSITION  
OF A MANIPULATOR OF A HANDLING DEVICE**

[0001] The present invention relates to a method and to a device for controlling the intermediate position<sup>1</sup> of a manipulator of a handling device that is movable in a plurality of degrees of freedom, relative to an object along a traverse path. The present invention also relates to a handling device having a manipulator that is movable in a plurality of degrees of freedom and whose intermediate position relative to an object is controllable.

[0002] The handling device is designed, for example, as a multi-jointed industrial robot. Industrial robots of this kind are used, in particular, in the automotive industry, [specifically] in production and quality assurance. The manipulator can have any given design to accommodate the various possible applications of an industrial robot.

[0003] The manipulator is designed, for example, as a tool, in particular as a welding device, as a device for applying adhesive, paint, or other coatings to a surface, as a processing device, or the like. The manipulator can be designed as a gripper, as a suction cup, or the like, for grasping one or more objects. Finally, it is conceivable for the manipulator to be designed as a sensing head, for example, for measuring the surface profile of an object, a gap width, a gap offset, a coating thickness, or the like.

[0004] In order for the manipulator to perform its designated task, it is necessary to move it into a defined intermediate position relative to an object. In accordance with the present patent [sic. invention], intermediate position is understood to be both the positioning, as well as orientation of the manipulator relative to the object.

---

<sup>1</sup> **Translator's note:** "Intermediate position" was selected as the translation for "Vorhalteposition." Siemens refers to this as "predicted position," in other words "the position reached by the robot if it moves with the selected velocity for the next time interval and then stops with maximal decelerations." Since this application speaks often of "predictive control of the position," calling it "predictive control of the predicted position" would have been redundant. Other terms used in the literature include "limit point," "deceleration point," "anticipation point," "prestop," "ready position," and "forward limit position."

[0005] From the related art, handling devices are known which have an internal open-loop control device. In response to an open-loop control program, which is executable on the open-loop control device, the manipulator can be moved along a programmed traverse path into the intermediate position. When the object is always located at the same position, this type of control of the traverse path up to the intermediate position suffices entirely. However, if the position of the object is subject to certain fluctuations, as is normally the case, it is no longer possible to ensure, alone by an open-loop control, that a defined intermediate position of the manipulator relative to the object will always be able to be assumed with the requisite precision. There can be many different causes of fluctuations in the position of the object.

[0006] To ensure that the intermediate position of the manipulator relative to the object is always assumed with the requisite precision, even in the case of positional fluctuations of the object, it is likewise known from the related art to control the intermediate position of the manipulator relative to the object. Different methods for controlling the intermediate position of the manipulator are known from the related art. However, these known methods for controlling the intermediate position are very complicated and slow.

[0007] In the course of controlling the intermediate position of the manipulator relative to an object, the actual intermediate position of the manipulator is initially recorded by sensors and then controlled to a setpoint intermediate position. The sensors are designed, for example, as optical or as tactile sensors.

[0008] In particular, they are designed as laser sensors for measuring distances, as force/moment sensors for measuring forces or moments, or as contact sensors for detecting a contacting of the object.

[0009] The sensors are arranged in a specific relation (position and orientation) to the manipulator. Before the control of the intermediate position is carried out, the sensors must be brought into a specific relation with the manipulator and the object (set up), and the parameters of the control must be adapted to the specific relation (calibration). The relation between the sensors and the manipulator can change due to temperature fluctuations, mechanical actions on the sensors or the manipulator, or the like, thereby necessitating a

repeated calibration and possibly even a repeated setting up of the device for implementing the control. During set-up and calibration, the device is not available for a control; the process of controlling the intermediate position must be interrupted.

[0010] Moreover, all of the known methods for controlling the intermediate position of the manipulator have the disadvantage that the traversing velocity of the manipulator is relatively low, since the control is carried out without knowledge of the manipulator traverse path to be controlled that lies ahead. For that reason, the traversing velocity must be selected to be low enough to ensure a rapid and precise positioning of the manipulator, even in the extreme case of a reversal in the traversing direction. A too-high traversing velocity in the context of highly curved traverse paths or a reversal in the traversing direction would cause the manipulator to overshoot the controlled traverse path and thereby leave the same.

[0011] It is, therefore, an object of the present invention to develop and further refine a method of the type mentioned at the outset in a way that will enable a fastest possible control of the intermediate position to be achieved and, in particular, higher traversing velocities of the manipulator on the traverse path to be realized, without incurring any loss of control precision.

[0012] To achieve this objective, starting out from the method of the type mentioned at the outset, the present invention provides that a plurality of points of at least one portion of the actual traverse path be stored, and that a predictive control of the intermediate position of the manipulator along this portion of the traverse path be consulted.

[0013] It has been discovered in accordance with the present invention that, through the use of a predictive control, it is possible to substantially accelerate the control of the intermediate position in a simple manner. The configuration of the traverse path that lies ahead is considered during the predictive control of the intermediate position. When permitted by the configuration of the traverse path that lies ahead, for example when working with a straight or an only slightly curved traverse path, a high traversing velocity may be selected for the manipulator. This makes it possible to substantially accelerate the control of the intermediate position along a traverse path. In the case of increasing curvature of the traverse path that lies ahead, it is necessary to increasingly reduce the traversing velocity. In

addition, by selecting a low traversing velocity when working with pronounced curvatures of the upcoming traverse path, it is possible to significantly enhance the accuracy of the control of the manipulator's intermediate position along the traverse path. Thus, in accordance with the method of the present invention, the traversing velocity may be individually adapted to the configuration of the traverse path that lies ahead.

[0014] The points of the actual traverse path may be determined in different ways, for example empirically, through simulation, or by calculation. When the points of the actual traverse path are determined empirically, the individual points may be approached by the manipulator of the handling device either manually or in a process controlled by a first open-loop control device. When the points are determined through simulation, a model of the handling device and of the object is first generated, preferably on a computer. On the basis of this model, the actual traverse path is then determined by simulating the traverse path. When the points of the actual traverse path are computed mathematically, a mathematical model of the handling device and of the object is first generated; and the points are then computed by solving mathematical equations.

[0015] In accordance with one advantageous embodiment of the present invention, the actual traverse path of the manipulator is traveled prior to the process of controlling the intermediate position and, in the process, the points of at least one portion of the actual traverse path are recorded and stored. There is no need for stringent demands to be placed on precision when traveling [covering] the actual traverse path, since the traverse path may be corrected during the subsequent control of the traverse path of the manipulator. The traveled actual traverse path merely represents an estimation of the configuration of the setpoint traverse path and must be accurate enough to be used for a predictive control of the manipulator's intermediate position along the traverse path.

[0016] The actual traverse path is advantageously traveled in a controlled process by the manipulator before the intermediate position is controlled by an internal open-loop control device of the handling device. An open-loop control program, in which the individual points of the actual traverse path are programmed, is executed on the internal open-loop control device. The handling device is driven by the open-loop control program in such a way that, during execution thereof, the manipulator travels the actual traverse path. In the process, the

points of at least one portion of the actual traverse path are recorded and stored. Apart from the points of the actual traverse path programmed in the open-loop control program, additional points of the actual traverse path may be recorded and stored.

[0017] The points of at least one portion of the actual traverse path are preferably recorded and stored by an external closed-loop control device. A closed-loop control program, which controls the intermediate position of the manipulator on the traverse path, is executed on the external closed-loop control device. The external closed-loop control device is designed, for example, as a personal computer (PC) or as an industrial personal computer. The closed-loop control program may be programmed in a standard programming language and be reprogrammed without entailing substantial outlay. Before controlling the intermediate position, the closed-loop control program may also record and store the points of the actual traverse path traveled by the manipulator, in one specific mode (record mode). The stored points are then consulted in another mode (operation mode) for the predictive control of the intermediate position.

[0018] Another advantageous embodiment of the present invention provides for the external closed-loop control device to be invoked by the internal open-loop control device. The open-loop control program of the internal open-loop control device is typically programmed in a proprietary programming language that is only executable on the open-loop control device of a specific handling device. Considerable outlay would have to be expended to integrate the entire closed-loop control program into the open-loop control program. For that reason, specific programming instructions (invocation instructions, return instructions) are provided in the open-loop control program, in order to invoke the closed-loop control program of the external closed-loop control device from the open-loop control program.<sup>2</sup> Little outlay is needed to insert these programming instructions into the open-loop control program. Depending on the mode in which the control is operated, by invoking the closed-loop control program of the closed-loop control device, the points of the actual traverse path are recorded and stored (record mode), or the intermediate position is predictively controlled (operation mode).

---

<sup>2</sup> Translator's note: This sentence should perhaps include "or to return again from the closed-loop control program to the open-loop control program" as stated in paragraph 0056.

[0019] In accordance with another advantageous embodiment of the present invention, prior to control of the intermediate position, the setpoint intermediate position of the manipulator is approached; measurement data characterizing the intermediate position of the manipulator are collected and stored while the setpoint intermediate position is changed in each instance by one degree of freedom; and the intermediate position is controlled as a function of the measurement data. A correlation exists between the collected measurement data and the position of the manipulator. Thus, information pertaining to the position of the manipulator is contained in the collected measurement data.

[0020] In another mode (parameter mode), the setpoint intermediate position is approached prior to control of the intermediate position. To approach the setpoint intermediate position in the parameter mode, the points of the actual traverse path stored in the record mode are consulted. As soon as the setpoint intermediate position is reached, a training phase begins, in which information required for the later control of the intermediate position carried out within the context of the operation mode, is ascertained.

[0021] During the training phase, the manipulator is moved by the setpoint intermediate position, in each case by one degree of freedom, into different intermediate positions relative to the object. The manipulator is moved by each degree of freedom into intermediate positions that preferably reside on both sides of the setpoint intermediate position. The intermediate positions of the manipulator are ascertained by sensors which are preferably affixed to the manipulator. The sensors supply measurement data, on whose basis an intermediate position of the manipulator is characterized. The measurement data include, for example, the distances from the sensors to the object, [and] forces or moments exerted by the object on the sensors. The measurement data may also be photogrammetric data. Photogrammetric data are collected by measuring images that were captured by a CCD camera or the like. In the course of the training phase, the measurement data are collected for each of the degrees of freedom for each of the intermediate positions. It is conceivable for the stored measurement data to be further processed for the control of the intermediate position. The training phase for this setpoint intermediate position is then concluded. The manipulator may approach another setpoint intermediate position and run through another training phase for this setpoint intermediate position until all setpoint intermediate positions have been approached. The parameter mode is then complete. The later control of the intermediate



position performed in the context of the operation mode is carried out as a function of the stored measurement data.

[0022] In the method according to the present invention, the training phase replaces the requisite set-up (positioning of the sensors relative to the object) and calibration (setting the parameters of the control) processes typical of conventional methods known from the related art for controlling the intermediate position of the manipulator of a handling device.

[0023] In this method as well, in which a training phase is executed prior to controlling of the intermediate position, a plurality of points of at least one portion of the actual traverse path are stored and are consulted for a predictive control of the intermediate position of the manipulator along this portion of the traverse path. However, the process of executing a training phase prior to control of the intermediate position is associated with the advantages indicated, even without these features of the characterizing part of claim 1. Therefore, the protection of the patent [*sic.* **the protection sought**] should also relate to a method of the last mentioned type, in which the features set forth in the characterizing part of claim 1 are missing.

[0024] In accordance with one preferred specific embodiment of the present invention, prior to controlling of the intermediate position:

- the setpoint intermediate position is approached;
- a setpoint measurement vector is recorded using the measurement data;
- for each degree of freedom, the manipulator of the handling device is moved out of the setpoint intermediate position into a plurality of intermediate positions, and a measurement vector is recorded in each intermediate position;
- for each degree of freedom, the absolute value of the gradient is determined for the same measurement data of the measurement vectors and is stored in a gradient matrix; and, in the course of the control of the intermediate position,
- a correction vector is determined by multiplying the inverse value of the gradient matrix by the difference between the setpoint measurement vector and an actual measurement vector in the actual intermediate position of the manipulator or on the basis of another suitable method; and
- the intermediate position is controlled as a function of the correction vector.

[0025] In accordance with this preferred specific embodiment, in the training phase in the parameter mode, the measurement data collected for the setpoint intermediate position are stored in a setpoint measurement vector, and the measurement data that were recorded for intermediate positions approached in the course of the training phase, are stored in measurement vectors. Thus, for each degree of freedom by which the manipulator is movable, a plurality of intermediate positions are approached from the setpoint intermediate position in each direction, and a measurement vector is recorded in each intermediate position. The dimension of the measurement vectors corresponds to the number of measurement data recorded for each intermediate position. The dimension of all measurement vectors is equal in magnitude.

[0026] The measurement vectors and the setpoint measurement vector are then further processed for each degree of freedom. From the same measurement data of the measurement vectors of one degree of freedom, the absolute value of the gradient is ascertained and stored in a gradient matrix. Thus, the gradient matrix has the dimensions (number of the measurement data recorded for each intermediate position) x (number of the degrees of freedom). It is conceivable to compute and store the inverse value of the gradient matrix already in the parameter mode. Preferably, however, it is first calculated in the subsequent operation mode. This concludes the training phase for this setpoint intermediate position. The gradient matrix may also be termed Jacobi matrix or sensitivity matrix.

[0027] In the course of the operation mode, an actual measurement vector is then ascertained for the control of the intermediate position of the manipulator, i.e., the measurement data are determined in the instantaneous intermediate position of the manipulator of the handling device and stored in the actual measurement vector. A differential vector is then formed from the difference between the setpoint measurement vector and the actual measurement vector. In addition, the inverse value of the gradient matrix is computed and optionally stored.

[0028] Finally, a correction vector is computed from the multiplication of the inverse value of the gradient matrix by the differential vector, and the intermediate position is controlled as a function of the correction vector.

[0029] The correction vector may also be determined using another suitable method, for example by using a sequential Kalman filter. Suitable methods of this kind for calculating the correction vector are known from the related art and can be used by one skilled in the art in any desired manner. The advantage of these other suitable methods is that the need is eliminated for the relatively complex process of forming the inverse value of the gradient matrix.

[0030] During the operation mode, the manipulator first travels the traverse path in accordance with the points stored during the record mode. This traverse path is then corrected in the course of the control of the intermediate position of the manipulator with the aid of the correction vector. Thus, in accordance with the method of the present invention, the control of the intermediate position is not absolute; rather, it is merely relative to an intermediate position on the stored traverse path.

[0031] The actual intermediate position is advantageously corrected in the course of the control of the intermediate position by a fraction of the correction vector, and the actual measurement vector in the corrected actual intermediate position and the correction vector derived therefrom, are ascertained once more. Thus, the actual intermediate position is not corrected by the entire correction vector. To prevent overshooting of the control, the attempt is made rather to approach the setpoint intermediate position slowly from one direction. This results in a control having a damped transient response. By suitably selecting the fraction of the correction vector, it is possible to determine the damping constant of the control.

[0032] The control of the intermediate position is preferably discontinued when each of the elements of the correction vector is smaller than an abort criterion. By properly selecting the abort criterion, it is possible to determine the precision of the control on the one hand, and the control speed on the other hand. The smaller the value of the abort criterion is selected, the more precisely the control of the intermediate position may be implemented. However, a small value of the abort criterion also signifies that the control requires more time until the abort criterion is met.

[0033] To ensure a controllability of the intermediate position of the manipulator within a

specific work volume of the control, the recorded measurement vectors should cover the entire work volume to the extent possible. In addition, for each degree of freedom, it is necessary to record as many measurement vectors as needed to make possible a reliable computation of the absolute value of the gradient of the measurement data. Therefore, one preferred specific embodiment of the present invention provides for at least two measurement vectors to be recorded in each direction for each degree of freedom, from the setpoint intermediate position. It is advantageous, however, for each degree of freedom, for five measurement vectors to be recorded in each direction, from the setpoint intermediate position. Thus, for each degree of freedom, ten measurement vectors and the setpoint measurement vector, thus eleven measurement vectors are derived. For each measuring datum that is recorded and stored in the measurement vectors, the absolute value of the gradient is computed and stored in the gradient matrix.

[0034] For each degree of freedom in which the intermediate position of the manipulator of the handling device is controlled, the measurement vectors, together, must contain at least one independent measuring datum. Another preferred specific embodiment of the present invention provides for the measurement vectors, together, to contain at least six measurement data. This makes it possible for the position and orientation of the manipulator relative to the object to be uniquely characterized in six degrees of freedom. As a result, the intermediate position of the manipulator may be controlled by six degrees of freedom in three-dimensional space. The measurement vectors preferably each contain 32 measurement data.

[0035] Another object of the present invention is to develop and further refine a device of the type mentioned at the outset in a way that will enable a fastest possible control of the intermediate position to be achieved and, in particular, higher traversing velocities of the manipulator on the traverse path to be realized, without incurring any loss of control precision.

[0036] To achieve this objective, starting out from the device of the type mentioned at the outset, the present invention provides that the device have means for implementing the method according to one of the claims 1 through 13.

[0037] Finally, another object of the present invention is to develop and further refine a

handling device of the type mentioned at the outset in a way that will enable a fastest possible control of the intermediate position to be achieved and, in particular, higher traversing velocities of the manipulator on the traverse path to be realized, without incurring any loss of control precision.

**[0038]** To achieve this objective, starting out from the device of the type mentioned at the outset, the present invention provides that the handling device have means for implementing the method according to one of the claims 1 through 13.

**[0039]** The device according to the present invention and the handling device according to the present invention have, in particular, means in order, in a record mode, to store a plurality of points of at least one portion of the actual traverse path and then, in an operation mode, to consult the stored points for a predictive control of the intermediate position of the manipulator along this portion of the traverse path. In addition, the device according to the present invention and the handling device according to the present invention have means in order, in a parameter mode, to drive the manipulator into a setpoint intermediate position; in the course of a training phase, to move the manipulator by the individual degrees of freedom of the handling device into other intermediate positions; and, for each degree of freedom, to record and store the measurement data in each intermediate position, thereby characterizing the corresponding intermediate position.

**[0040]** In the case of the device according to the present invention and the handling device according to the present invention, the predictive control allows an especially high traversing velocity to be selected for the manipulator. Moreover, the training phase replaces the processes of setting up and calibrating the sensors. Thus, the device according to the present invention and the handling device according to the present invention make possible a more rapid control of the intermediate position, without incurring any loss of control precision.

**[0041]** One advantageous embodiment of the present invention provides for at least one sensor to be affixed to the manipulator of the handling device to ascertain the actual intermediate position of the manipulator relative to the object.

**[0042]** The or each sensor is advantageously positioned relative to the object in such a

way that the sequence of the measurement data of the measurement vectors recorded for one degree of freedom is strictly monotonic. This important condition must be met to always allow the manipulator to be controlled from all positions and orientations relative to the object into the desired setpoint intermediate position.

[0043] In addition, the observability of the control must be ensured. For that reason, another advantageous specific embodiment of the present invention provides for the or each sensor to be positioned relative to the object in such a way that one absolute gradient value is contained in the gradient matrix for each degree of freedom, in each instance for at least one recorded measurement datum.

[0044] To enable the [sic. **WORD MISSING – absolute gradient values?**] in the gradient matrix to also be processed in the course of controlling the intermediate position and to lead to a reliable result, it is provided that the or each sensor be positioned relative to the object in such a way that the absolute gradient values in the gradient matrix are significant. One speaks of significant absolute gradient values when they are distinguishable from the measurement noise of the collected measurement data. The absolute gradient values are distinguishable, for example, when they are approximately twice as great as the measurement noise of the recorded measurement data. In the case that the gradient magnitude does not suffice, the absolute gradient value in question is interpreted as non-existent. The absolute gradient values in the gradient matrix are preferably approximately at least three times as great as the measurement noise.

[0045] The criteria of monotony of the sequence of the measurement data, of observability of the control, and of gradient magnitude may be influenced by the position of the sensors relative to the manipulator. However, the precise relation of the sensors to the manipulator is of secondary importance, as long as the criteria mentioned above are fulfilled. The relation of the sensors to the manipulator is detected during the training phase and considered in the control as a function of the recorded and stored measurement data.

[0046] One preferred specific embodiment of the present invention provides for the or each sensor to be designed as an optical sensor, in particular as a CCD camera. One object may be characterized in numerous ways through the use of CCD cameras. When working

with sensors designed as CCD cameras, it is conceivable that the measurement data be constituted as distances between the sensors and the object, as pixels on the CCD chip or the like. In addition, CCD cameras have the advantage that their field of view can be displayed on a screen, when aligning the sensors relative to the object. This substantially facilitates the process of aligning the sensors.

[0047] One preferred exemplary embodiment of the present invention is described in more detail below with reference to the drawings, in which:

[0048] FIG. 1: shows a handling device according to the present invention in accordance with one preferred specific embodiment;

[0049] FIG. 2: the manipulator of the handling device of FIG. 1, in a detail view; and

[0050] FIG. 3: a traverse path of a handling device according to the present invention.

[0051] In FIG. 1, a handling device according to the present invention is denoted in its entirety by reference numeral 1. Handling device 1 has a manipulator 2, which is movable in six degrees of freedom (x, y, z, a, b, c). Handling device 1 is designed, for example, as an industrial robot whose manipulator 2 is designed, for example, as any given tool or as a sensing head for recording any given measured quantities (temperature, distance, etc.).

[0052] In order for manipulator 2 to perform its designated task, it must be moved to a defined intermediate position relative to an object 3 (compare FIG. 2). In accordance with the present patent [sic. invention], intermediate position is understood to also include the orientation of manipulator 2 relative to object 3. The present invention provides a method for controlling the intermediate position. The method according to the present invention is not only suited for all types of pick-and-place applications, but also for applications in which a defined linear sequence must be followed, such as for welding, bonding or sealing of edges.

[0053] In accordance with the present exemplary embodiment, a sunroof 4 of a motor vehicle is to be grasped by manipulator 2 and inserted in a corresponding opening (object 3) in roof 5 of the body of the motor vehicle. Manipulator 2 is designed as a suction cup for

grasping sunroof 4. The intermediate position is a position above the opening from where runroof 4 may be moved in a rectilinear, vertical motion downwards into the opening.

[0054] Handling device 1 has an internal open-loop control device 6. In response to an open-loop control program, which is executable on open-loop control device 6, manipulator 2 may be moved along a programmed traverse path (compare FIG. 3) into the intermediate position. When object 3, in the present exemplary embodiment, the opening in roof 5 of the motor vehicle body, is always located at the same position, such a control of the traverse path up to the intermediate position suffices entirely. However, if the position of object 3 is subject to certain fluctuations, it is no longer possible to ensure, alone through the use of an open-loop control, that a defined intermediate position of manipulator 2 relative to object 3 will always be able to be assumed with the necessary precision. Fluctuations of object 3 may arise, for example, as the result of inaccuracies during positioning of the body relative to handling device 1 or due to motion of the body of the motor vehicle on a production line.

[0055] To ensure that the intermediate position of manipulator 2 relative to object 3 is always assumed with the necessary precision, even in the case of fluctuations of the position of object 3, in such cases, the intermediate position of manipulator 2 relative to object 3 is controlled in closed loop. Several methods for controlling the intermediate position of manipulator 2 in closed loop are known from the related art. However, these methods are very labor-intensive and time-consuming.

[0056] The method according to the present invention for the closed-loop control of the intermediate position of manipulator 2 includes various features for accelerating and simplifying the closed-loop control. The method is implemented on an external closed-loop control device 7 (compare FIG. 1). Closed-loop control device 7 is designed as a conventional personal computer (PC) or as an industrial personal computer. A closed-loop control program, which is programmed in a conventional programming language, is executable on control device 7. In FIG. 1, closed-loop control device 7 is configured separately from handling device 1. It is also conceivable, however, for closed-loop control device 7 to be integrated in handling device 1. The open-loop control program of open-loop control device 6 is programmed in a proprietary programming language that is only executable on open-loop control device 6 of this handling device 1. At certain locations, the open-loop control program



has programming instructions (invocation instructions, return instructions), to invoke the closed-loop control program of external closed-loop control device 7 from the open-loop control program or to return again from the closed-loop control program to the open-loop control program. A data line 8 for exchanging data is provided between open-loop control device 6 and closed-loop control device 7.

[0057] In FIG. 2, it is discernible that four sensors 9 designed as CCD cameras are mounted on manipulator 2. Sensors 9 are used to establish a relation between the form of edges 10 and manipulator 2. To that end, measurement data, which in the present exemplary embodiment are constituted as pixel values of the CCD chips of sensors 9, are collected and stored in measurement vectors.

[0058] The method according to the present invention for controlling the intermediate position of manipulator 2 relative to object 3 features three different operating states. In a first operating state, the so-called record mode, traverse path A through B (compare FIG. 3) is traveled under open-loop control by open-loop control program of open-loop control device 6 towards an intermediate position and away from the intermediate position. Located in the area of the traverse path between points C and D is a region of interest for the closed-loop control that includes one or more intermediate positions of manipulator 2, which are to be controlled in closed-loop relative to object 3. In response to manipulator 2 reaching point C as it travels the traverse path, the closed-loop control program of closed-loop control device 7 is invoked. While the traverse path is traveled in open-loop control from point C through D, one or more points are then recorded and stored by the closed-loop control program. When the traverse path has reached point D, the closed-loop control program is ended. This ends the record mode. The stored points of the traverse path are then accessed in a third operating state of the closed-loop control.

[0059] In a second operating state, the so-called parameter mode, manipulator 2 travels the traverse path from point A to point C under control of the open-loop control program. When the traverse path has reached point C, the closed-loop control program is invoked, and the open-loop control program cedes control of manipulator 2 to the closed-loop control program. The closed-loop control program travels the stored traverse path between points C and D. On the traverse path, those intermediate positions are approached which are to be

controlled in closed-loop relative to the object, and a training phase is executed for each intermediate position. When the traverse path controlled by the closed-loop control program has reached point D, the closed-loop control program is ended, and the control of manipulator 2 along the traverse path is again returned to the open-loop control program. Manipulator 2 then travels the remaining traverse path from point D through B under control of the open-loop control program. This ends the parameter mode.

[0060] A training phase is executed for each intermediate position which is to be controlled in closed loop relative to object 3. To that end, the setpoint intermediate position is first approached by manipulator 2, and the values of 32 measurement data which characterize the setpoint intermediate position, are recorded by sensors 9 and stored in a setpoint measurement vector  $y_{\text{setpoint}}$ . Thus, setpoint measurement vector  $y_{\text{setpoint}}$  has the dimension  $32 \times 1$  (32 measurement data  $\times$  1 value). Manipulator 2 is subsequently moved by each of the six degrees of freedom, one after another, into five intermediate positions in the one direction of the setpoint intermediate position and into five intermediate positions in the other direction of the setpoint intermediate position. In each intermediate position, the corresponding values of the 32 measurement data are recorded and stored in measurement vectors. From the ten measurement vectors and setpoint measurement vector  $y_{\text{setpoint}}$ , the absolute value of the gradient of a specific measurement datum is then computed for each of the six degrees of freedom and is stored in a gradient matrix C. Thus, gradient matrix C has the dimension  $32 \times 6$  (32 measurement data  $\times$  6 degrees of freedom). Thus, for each of the intermediate positions to be controlled in closed loop, one obtains a setpoint measurement vector  $y_{\text{setpoint}}$  and gradient matrix C.

[0061] In a third operating state, the so-called operation mode, manipulator 2 travels the traverse path from point A to point C under control of the closed-loop control program. When the traverse path has reached point C, the closed-loop control program is invoked, and the open-loop control program cedes control of manipulator 2 to the closed-loop control program. The closed-loop control program travels the stored traverse path between points C and D. The stored points of the traverse path permit a predictive control of the intermediate positions on the traverse path, which, given the same or even greater precision, renders possible a substantially higher traverse-path velocity than do related-art methods for controlling the intermediate position of a manipulator.

[0062] Located in the area of the traverse path between points E and F is a region of interest for the closed-loop control that includes one or more intermediate positions of manipulator 2, which are to be controlled in closed-loop relative to object 3. As soon as the traverse path reaches point E, the intermediate position is controlled in closed loop on the traverse path. In the course of the closed-loop control of the intermediate position, the corresponding values of the measurement data are initially recorded by sensors 9 in the instantaneous actual intermediate position and stored in an actual measurement vector  $y_{\text{actual}}$ . The actual measurement vector  $y_{\text{actual}}$  likewise has the dimension  $32 \times 1$  (32 measurement data  $\times$  1 value). From the difference between the setpoint measurement vector and the actual measurement vector, a differential measurement vector  $D_y$  is formed ( $D_y = y_{\text{setpoint}} - y_{\text{actual}}$ ). Differential measurement vector  $D_y$  likewise has the dimension  $32 \times 1$ . The inverse value of gradient matrix C is then computed and optionally stored. From the product of the inverse value of gradient vector C and of differential measurement vector  $D_y$ , a correction vector  $D_x$  is ascertained, which likewise has the dimension  $32 \times 1$ . It is also conceivable, however, for correction vector  $D_x$  to be ascertained using another suitable method, for example by employing a sequential Kalman filter.

[0063] A portion of correction vector  $D_x$ , preferably about 10% of correction vector  $D_x$ , is used for correcting the actual intermediate position of manipulator 2. In the new actual intermediate position, the corresponding values of the measurement data are once again recorded and stored in an actual measurement vector  $y_{\text{actual}}$ . As already described above, a correction vector  $D_x$  is once again computed, and the actual intermediate position is corrected as a function of correction vector  $D_x$ . The process of correcting the actual intermediate position is repeated until the individual values of correction vector  $D_x$  have fulfilled a specific abort criterion, i.e., until manipulator 2 is controlled in closed loop to the setpoint intermediate position.

WHAT IS CLAIMED IS:

1. A method for controlling the intermediate position of a manipulator (2) of a handling device (1) that is movable in a plurality of degrees of freedom, relative to an object (3) along a traverse path,  
wherein a plurality of points of at least one portion of the actual traverse path are stored and are consulted for a predictive control of the intermediate position of the manipulator (2) along this portion of the traverse path.
2. The method as recited in claim 1,  
wherein the actual traverse path of the manipulator (2) is traveled prior to the process of controlling the intermediate position and, in the process, the points of at least one portion of the actual traverse path are recorded and stored.
3. The method as recited in claim 2,  
wherein the actual traverse path is traveled by the manipulator (2) in a controlled process before the intermediate position is controlled by an internal open-loop control device (6) of the handling device (1).
4. The method as recited in claim 2 or 3,  
wherein the points of at least one portion of the actual traverse path are recorded and stored by an external closed-loop control device (7).
5. The method as recited in claims 3 and 4,  
wherein the external closed-loop control device (7) is invoked by the internal open-loop control device (6).
6. The method for controlling the intermediate position of a manipulator (2) of a handling device (1) that is movable in a plurality of degrees of freedom, relative to an object (3) along a traverse path, in particular as recited in one of claims 1 through 5,  
wherein, prior to control of the intermediate position, the setpoint intermediate position of the manipulator (2) is approached, while the setpoint intermediate position is changed in each instance by one degree of freedom; measurement data

characterizing the intermediate position of the manipulator (2) are collected and stored; and the intermediate position is controlled as a function of the measurement data.

7. The method as recited in claim 6,  
wherein, prior to the control of the intermediate position:
  - the setpoint intermediate position is approached;
  - a setpoint measurement vector ( $y_{\text{setpoint}}$ ) is recorded using the measurement data;
  - for each degree of freedom, the manipulator (2) of handling device (1) is moved out of the setpoint intermediate position into a plurality of intermediate positions, and a measurement vector is recorded in each intermediate position;
  - for each degree of freedom, the absolute value of the gradient is determined for the same measurement data of the measurement vectors and is stored in a gradient matrix (C), and, in the course of the control of the intermediate position,
  - a correction vector ( $D_x$ ) is determined by multiplying the inverse value of the gradient matrix (C) by the difference between the setpoint measurement vector ( $y_{\text{setpoint}}$ ) and an actual measurement vector ( $y_{\text{actual}}$ ) in the actual intermediate position of the manipulator (2) or on the basis of another suitable method; and
  - the intermediate position is controlled as a function of the correction vector ( $D_x$ ).
8. The method as recited in claim 7,  
wherein the actual intermediate position of the manipulator (2) is corrected in the course of the control of the intermediate position by a fraction of the correction vector ( $D_x$ ), and the actual measurement vector ( $y_{\text{actual}}$ ) in the corrected actual intermediate position and the correction vector ( $D_x$ ) derived therefrom, are ascertained once more.
9. The method as recited in claim 8,  
wherein the control of the intermediate position is discontinued when each of the elements of the correction vector ( $D_x$ ) is smaller than an abort criterion.
10. The method as recited in claim 8 or 9,  
wherein, for each degree of freedom, at least two measurement vectors are recorded in

each direction, from the setpoint intermediate position.

11. The method as recited in claim 10,  
wherein, for each degree of freedom, five measurement vectors are recorded in each direction, from the setpoint intermediate position.
12. The method as recited in one of claims 1 through 5,  
wherein, together, the measurement vectors contain at least six measurement data, in order that the position and orientation of the manipulator (2) relative to the object (3) be characterized in three-dimensional space.
13. The method as recited in claim 12,  
wherein the measurement vectors each contain 32 measurement data.
14. A device for controlling the intermediate position of a manipulator (2) of a handling device (1) that is movable in a plurality of degrees of freedom, relative to an object (3) along a traverse path,  
wherein the device includes means for implementing the method as recited in one of the claims 1 through 13.
15. A handling device (1) having a manipulator (2) that is movable in a plurality of degrees of freedom and whose intermediate position relative to an object (3) is controllable,  
wherein the handling device (9) includes means for implementing the method as recited in one of the claims 1 through 13.
16. The handling device (1) as recited in claim 15,  
wherein at least one sensor (9) is affixed to the manipulator (2) of the handling device (1) to ascertain the actual intermediate position of the manipulator (2) relative to the object (3).
17. The handling device (1) as recited in claim 16,  
wherein the or each sensor (9) is positioned relative to the object (3) in such a way

that the sequence of the measurement data of the measurement vectors recorded for one degree of freedom is strictly monotonic.

18. The handling device (1) as recited in claim 17,  
wherein one absolute gradient value is contained in the gradient matrix (C) for each degree of freedom, in each instance for at least one recorded measurement datum.
19. The handling device (1) as recited in claim 18,  
wherein the absolute gradient values in the gradient matrix (C) are significant.
20. The handling device (1) as recited in one of claims 15 through 19,  
wherein the or each sensor (9) is designed as an optical sensor.
21. The handling device (1) as recited in claim 20,  
wherein the or each sensor (9) is designed as a CCD camera.

## ABSTRACT

A method for controlling the intermediate position of a manipulator (2) of a handling device (1) that is movable in a plurality of degrees of freedom, relative to an object (3) along a traverse path. To make possible a more rapid control of the intermediate position, it is provided for a plurality of points of at least one portion of the actual traverse path to be stored and for a predictive control of the intermediate position of the manipulator (2) along this portion of the traverse path to be consulted.